

Conference Paper, Published Version

**Hafner, Tobias; Schindler, Manfred**

## **Modellierung von Kurvenströmungen mit einem 2D-tiefengemittelten HN-Modell**

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

**Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103804>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Hafner, Tobias; Schindler, Manfred (2006): Modellierung von Kurvenströmungen mit einem 2D-tiefengemittelten HN-Modell. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Strömungssimulation im Wasserbau (Flow Simulation in Hydraulic Engineering). Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 32. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 49-56.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



## **Modellierung von Kurvenströmungen mit einem 2D-tiefengemittelten HN-Modell**

Tobias Hafner, Manfred Schindler

This paper reports experiences in the modelling of flow behaviour in curved channels with a two-dimensional depth-averaged numerical model. Additionally so called dispersion terms are used to take into account the effects of secondary currents in channel bends. The results of the 2D-simulation are compared with the results of two three-dimensional numerical models and show good agreement after calibration. It is also shown that, in some cases, an estimation for the vertical and horizontal secondary velocities is possible even with a simple two-dimensional model.

### **1 Einleitung**

Die Strömungsprozesse in Flusskurven sind von drei-dimensionalem Charakter. Daher sollte eher einem drei-dimensionalen Simulationsprogramm der Vorzug gegeben werden. Hat die numerische Simulation das Ziel, morphologische Prozesse wie Sohl- und Böschungserosionen über lange Zeiträume und mehrere Kilometer Fließstrecke zu studieren, besitzen 2D-Programme allein wegen der kürzeren Rechenzeiten einen großen Vorteil. Vor diesem Hintergrund soll das bestehende 2D-Modell<sup>1</sup> UFERLOS zur Simulation von Sohl- und Böschungserosion in geraden Fließstrecken (Schmautz, 2003) weiterentwickelt werden, um in Zukunft auch für kurvige Fließstrecken Aussagen über mögliche morphologische Entwicklungen treffen zu können. Ein Kernpunkt dieser Weiterentwicklungen ist die Berücksichtigung von Sekundärströmungseffekten 1. Ordnung in den Strömungsgleichungen des 2D-Modells.

Grundsätzlich sind in den Flachwassergleichungen die Fliehkräfte implizit enthalten. Hierdurch stellt sich auch in 2D-Modellen in Kurven ein Quergefälle im Wasserspiegel ein. Nicht berücksichtigt wird jedoch in den Standard 2D-

---

<sup>1</sup> Ursprung dieses Programms ist das Modell RISMO-2D (weitere Information und Download unter [www.hnware.de](http://www.hnware.de)), welches an der RWTH Aachen von Herrn Dr. Schröder im Rahmen des DFG-Projekts Ro 365/31-6 entwickelt und anschließend um Ansätze des Geschiebetransports und der Böschungserosion an der TU München ergänzt wurde.

Ansätzen der Einfluss der Sekundärströmung, welcher für die Verlagerung des Geschwindigkeitsmaximums zur Außenseite sorgt. Hierdurch wird in den meisten 2D-Modellen die Geschwindigkeit in Kurveninnenseite über- und an der Außenseite unterschätzt.

## 2 Dispersionsterme

In der Literatur sind verschiedene Ansätze zu finden, um mit 2D-tiefengemittelten Modellen in Flusskurven bessere Simulationsergebnisse zu erzielen. Hier wird auf die Möglichkeit der Modellierung über so genannte Dispersionssterme zurückgegriffen, welche in die Flachwassergleichungen als zusätzliche Terme erscheinen. Diese Terme (1) berücksichtigen die Abweichungen des vertikalen Geschwindigkeitsprofils von den tiefengemittelten Geschwindigkeiten (Stein, 1990).

$$\begin{aligned} D_{UU}^C &= \int_0^h \rho(u_c - U_c)^2 dz \\ D_{VV}^C &= \int_0^h \rho(v_c - V_c)^2 dz \quad \rho = \text{Dichte [kg/m}^3\text{]} \\ D_{UV}^C &= \int_0^h \rho(u_c - U_c)(v_c - V_c) dz \end{aligned} \quad (1)$$

(h = Fließtiefe,  $U_c, u_c$  = Geschwindigkeiten in Längsrichtung (tangential) und  $V_c, v_c$  = Geschwindigkeiten in radialer Richtung; Die Großbuchstaben stehen für die tiefengemittelten Werte)

Berechnen lassen sich diese Terme, wenn sowohl für die Hauptströmung  $u_c$  als auch für die Sekundärströmung  $v_c$  die Geschwindigkeitsprofile bekannt sind. Unter der Annahme eines logarithmischen Hauptströmungsprofils sind mit Kenntnis der tiefengemittelten Geschwindigkeit  $U$  auch die Werte  $u_c$  über die Fließtiefe  $h$  bekannt. In den hier verwendeten Dispersionstermen (Herleitung Malcherek, 2001) wird als Sekundärströmungsprofil ein lineares Profil so angenommen (2), dass der tiefengemittelte Wert  $V_c$  bei einer voll entwickelten Sekundärströmung zu null wird.

$$v_c(z) = v_{\text{Sec}} \left( \frac{2z}{h} - 1 \right) \quad v_{\text{Sec}} = \text{Sekundärströmung an der Oberfläche} \quad (2)$$

Das Profil (2) der Sekundärströmung ist folglich bekannt, wenn ein Wert für  $v_{\text{Sec}}$  an der Wasserspiegeloberfläche gefunden wird. Mit bestimmten Vereinfachungen (z.B. hydrostatischer Druck, parabolischem Ansatz für die Verteilung der Wirbelviskosität) lässt sich für  $v_{\text{Sec}}$  folgende Beziehung herleiten (siehe Malcherek, 2001).

$$v_{sec} = \alpha \frac{U_c h}{R} \quad \text{mit } \alpha = \frac{2m+1}{2\kappa^2 m} \quad \text{und } m = \kappa \frac{U_c}{u_*} \quad (3)$$

(h = Fließtiefe,  $\kappa$  = Karman-Konstante,  $u_*$  = Schubspannungsgeschwindigkeit, R = Radius)

Für die Dispersionsterme ergibt sich nun mit Hilfe der getroffenen Profilannahmen die Beziehung (4).

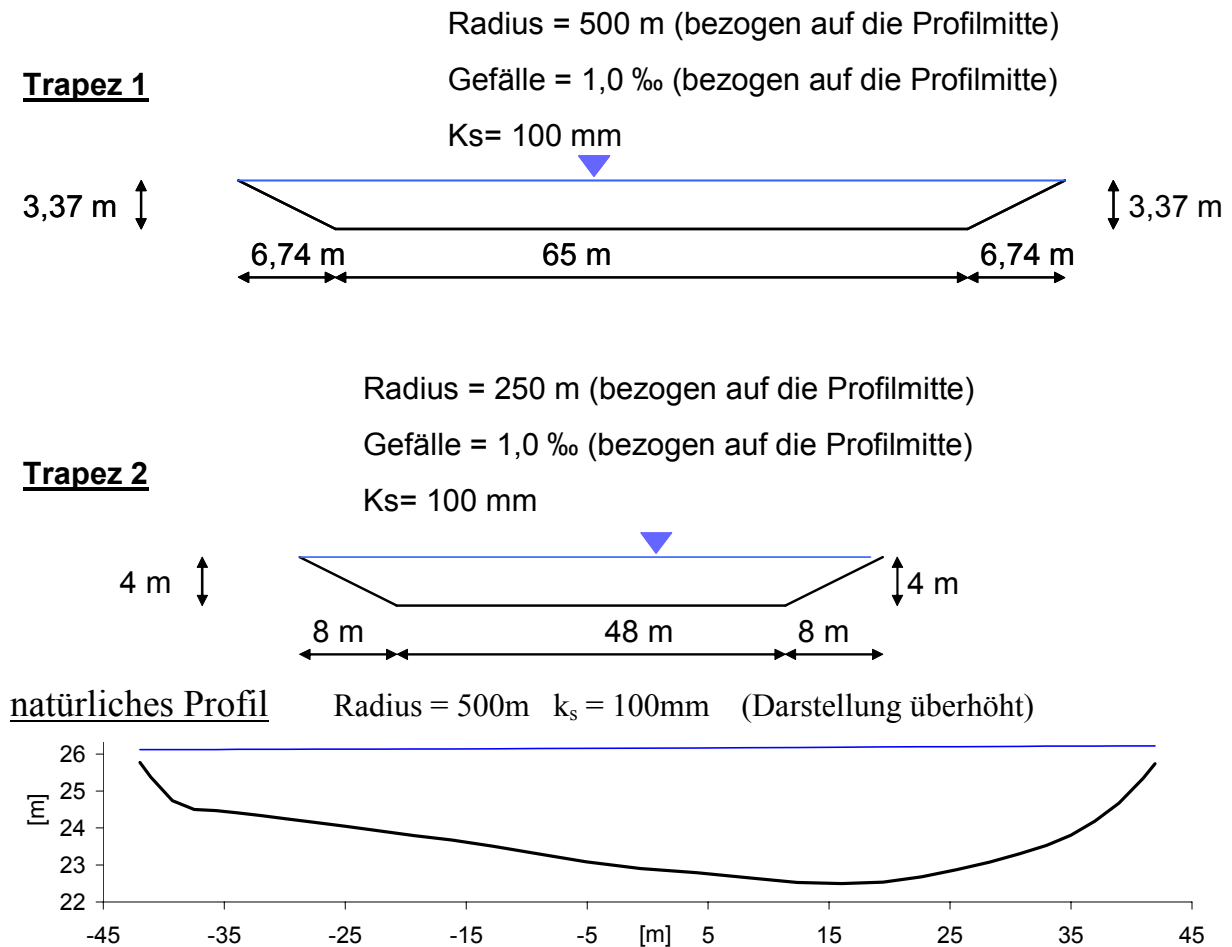
$$\begin{aligned} D_{UU}^C &= \int_0^h \rho (u_c - U_c)^2 dz &&= \rho \frac{U_c^2}{m^2} h \\ D_{VV}^C &= \int_0^h \rho (v_c - V_c)^2 dz &&= \rho \frac{1}{3} \alpha^2 \frac{U_c^2 h^3}{R^2} \\ D_{UV}^C &= \int_0^h \rho (u_c - U_c) (v_c - V_c) dz &&= \rho \frac{1}{2} \frac{\alpha}{m} \frac{U_c^2 h^2}{R} \end{aligned} \quad (4)$$

Die Terme (4) sind in Strömungsrichtung orientiert und werden zur Verwendung in dem vorliegenden kartesischen Koordinatensystem noch entsprechend transformiert (Transformationsvorschriften siehe Duan, 2004).

In den aufgeführten Gleichungen taucht der Radius auf. Dieser ist in der 2D-Berechnung zunächst nicht bekannt. Er könnte zwar von dem Benutzer vorab angegeben werden, dies ist allerdings bei morphologischen Berechnungen, bei denen sich die Lauform des Flusses ändert nicht sinnvoll. Der Radius muss also in der Simulation dynamisch bestimmt werden. Hierzu wurden zwei Möglichkeiten untersucht. Zum einen kann aus den Strömungsvektoren der Radius der Stromlinien ermittelt werden, zum anderen lässt sich auch über das Quergefälle des Wasserspiegels der Radius zurückrechnen (Zanke, Mewis; 2002). Bei Vergleichsrechnungen zeigte die erste Möglichkeit hier tendenziell die besseren Ergebnisse.

### 3 Vergleichsrechnungen mit 3D-Modellen

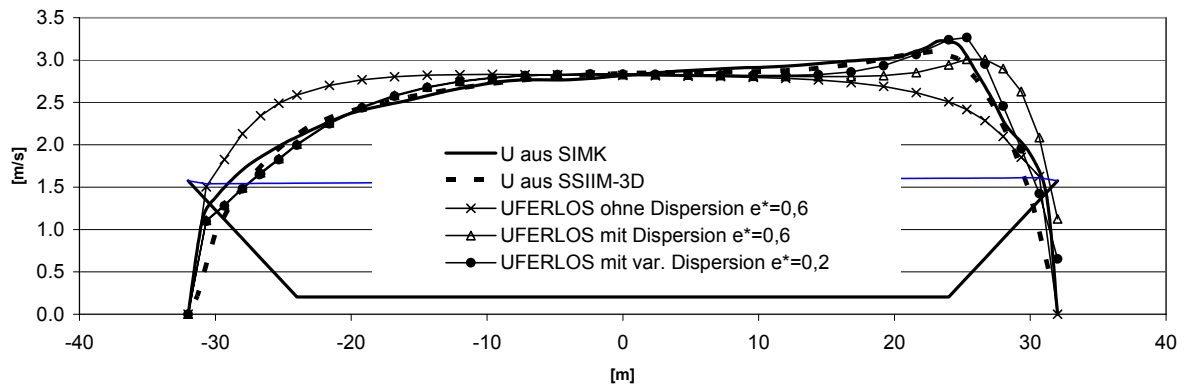
Mit dem durch obige Ansätze erweiterten 2D-Modell wurden drei Testgeometrien (Abbildung 1) simuliert und die Ergebnisse anschließend mit Simulationsergebnissen eines 3D-Modells (SSIIM-3D, Olsen) und eines 3D-Querschnittsmodells (SIMK, Kölling, 1994) verglichen.



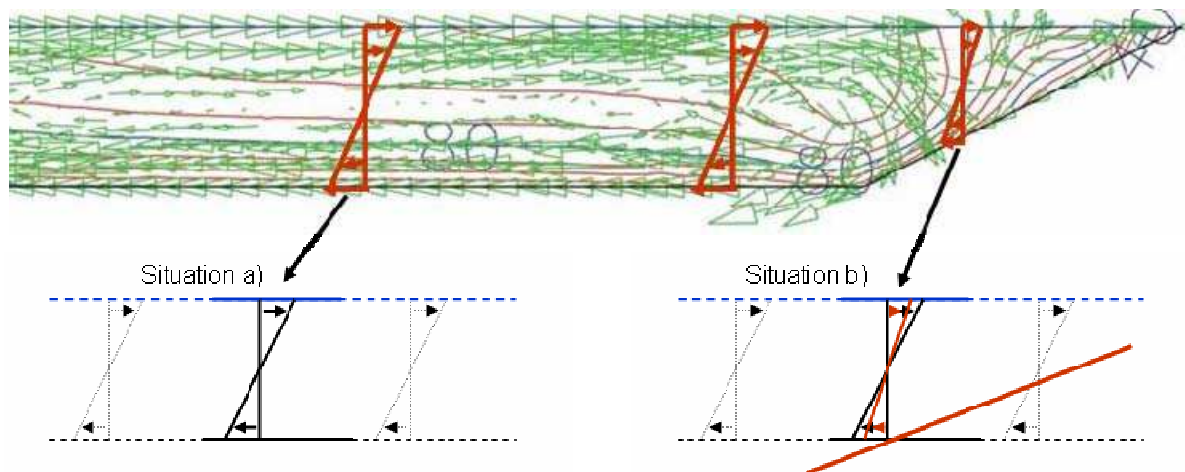
**Abbildung 1** Testgeometrien

Abbildung 2 zeigt verschiedene Simulationsergebnisse des 2D-Modells und die Ergebnisse der beiden 3D-Modelle. Ohne Dispersionsterme liegt das Geschwindigkeitsmaximum im 2D-Modell an der Kurveninnenseite. Durch die Dispersionsterme gelingt es auch im 2D-Modell das Geschwindigkeitsmaximum an die rechte Kurvenaußenseite zu verlagern. Es zeigt sich allerdings, dass das Maximum etwas zu weit in den Böschungsbereich gedrängt wird. Dies ist vermutlich dadurch zu begründen, dass der Ansatz zur Ermittlung der Sekundärströmungen im 2D-Modell (Gleichung 3) lediglich die Fließtiefe nicht aber die geometrische Gesamtsituation berücksichtigt und so im Böschungsbereich vermutlich zu hohe Sekundärströmungen angesetzt werden (siehe Abbildung 3 - Situation b). Hierauf wurde im Pralluferbereich ein modifizierter Dispersionsansatz (var. Dispersion) eingeführt in welchem der verwendete Sekundärströmungsradius durch eine Art Blendingfunktion ergänzt wird (Gleichung (4)). Letztendlich werden so die berechneten Sekundärströmungen im Böschungsbereich in Abhängigkeit der Böschungsneigung  $\beta$  abgemindert. Weiter wurde der Wert für die dimensionslose Diffusivität  $e^*$  auf 0,2 herabgesetzt, wodurch geringere Werte für die Wirbelviskosität berechnet werden. Hierdurch gelingt es, das Geschwindigkeitsmaximum im 2D-Modell

etwas von der Böschung in Richtung Böschungsfuß zu verlagern. 3D und 2D Ergebnisse stimmen nach der Kalibrierung gut überein. Für die Kalibrierkonstante  $k_B$  in Gleichung (4) wurde hier 1,8 verwendet.



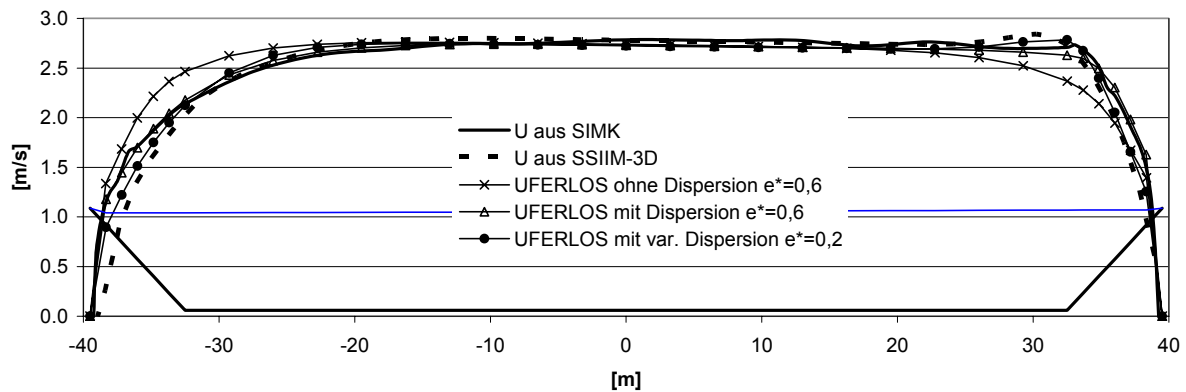
**Abbildung 2** Simulationsergebnisse Trapez 2 – tiefengemittelte Geschwindigkeiten



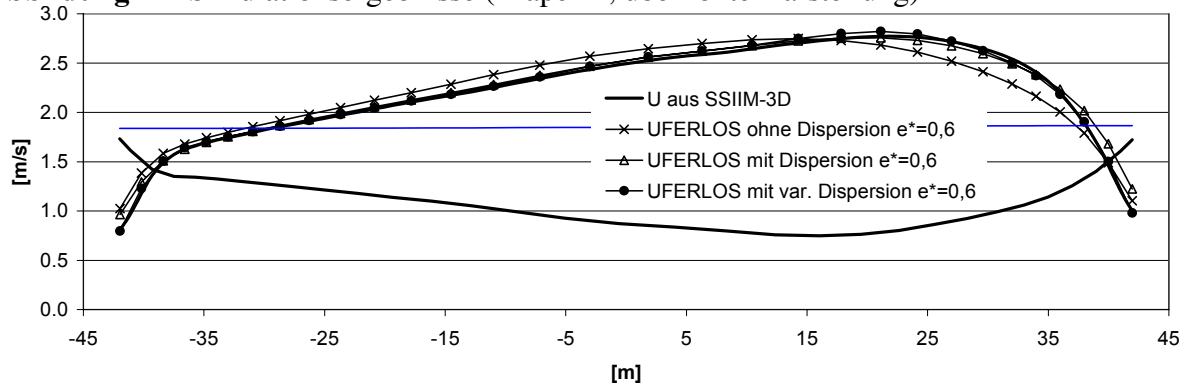
**Abbildung 3** Prinzipskizze der Sekundärströmung im Uferbereich

$$1/R_{\text{sec}} \Rightarrow 1/R_{\text{sec}} \cdot (1 - k_B \cdot \tan(\beta)) \geq 0 \quad \text{mit } k_B = \text{Kalibrierkonstante} \quad (4)$$

Die gefundenen Einstellungen wurden für das natürliche Profil bzw. Trapez 1 beibehalten. Ohne weitere Kalibrierung ergaben sich mit dem 2D-Modell bei Verwendung der Dispersionsterme gute Übereinstimmungen mit den Ergebnissen der beiden 3D-Modelle (Abb. 4 und Abb. 5).

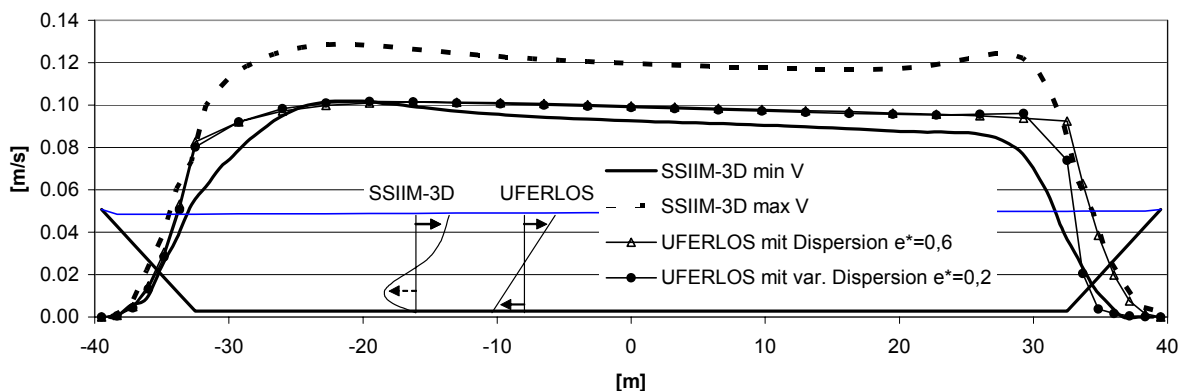


**Abbildung 4** Simulationsergebnisse (Trapez 1, überhöhte Darstellung)



**Abbildung 5** Simulationsergebnisse (natürliches Profil, überhöhte Darstellung)

In der Abbildung 6 wurden für das Trapez 1 die Sekundärströmungen aus SSIIM-3D mit denen aus UFERLOS verglichen. Für das 3D-Modell sind jeweils die maximalen Werte für die sohnnahe nach innen gerichtete und die nach außen gerichtete Strömung angegeben. In UFERLOS sind beide Werte aufgrund der linearen Profilannahme identisch. Die Größenordnung der im 2D-Modell errechneten Sekundärströmung stimmt gut mit dem 3D-Modell überein.



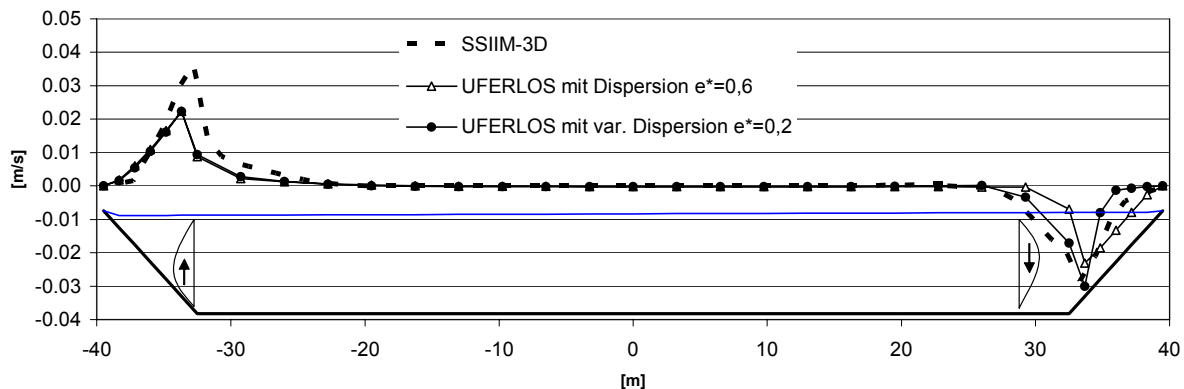
**Abbildung 6** Vergleich der horizontalen Sekundärströmungen für Trapez 1

Ist ein Sekundärströmungsprofil bekannt, kann hieraus mit Hilfe einer einfachen Kontinuitätsbetrachtung (Gleichung 5) auch im 2D-Modell ein Wert für die im Böschungsbereich auftretenden vertikalen Strömungskomponenten abgeschätzt werden. Für das lineare Sekundärströmungsprofil (2) ergibt sich für die maximal

auftretende vertikale Geschwindigkeitskomponente  $w_{\max}$  an einem beliebigen Ort im Querschnitt:

$$w_{\max} = \frac{\partial(v_{\text{sec}} \cdot h/4)}{\partial r} \quad \text{mit } v_{\text{sec}} \text{ aus Gl. (3); } r = \text{radiale Richtung} \quad (5)$$

In der Abbildung 7 sind die in der 3D-Berechnung maximal über die Fließtiefe aufgetretenen Vertikalströmungen für Trapez 1 mit denen in UFERLOS berechneten verglichen. Es zeigt sich, dass auch mit einem 2D-Modell die Vertikalströmungen, die aufgrund von Sekundärströmungen im Böschungsbereich auftreten, abgeschätzt werden können.



**Abbildung 7** Vergleich der vertikalen Strömungskomponente für Trapez 1

## 4 Zusammenfassung

Mit Hilfe der Dispersionsterme lassen sich mit dem 2D-Modell für die hier aufgeführten moderaten Krümmungssituationen nach erfolgter Kalibrierung ähnliche Ergebnisse wie mit 3D-Modellen erzielen. Die Längsgeschwindigkeiten, die horizontalen Sekundärströmungen und die auftretenden vertikalen Strömungen im Böschungsbereich lassen sich hierdurch im 2D-Modell näherungsweise abbilden. Die hier vorgestellten Ansätze wurden mit Simulationsergebnissen von „idealen Kreisströmungen“ verglichen. Wie sich das 2D-Modell bei aufeinander folgenden gegensinnigen Kurven verhält, ist nicht untersucht. Es ist anzunehmen, dass die Simulationsergebnisse des 2D-Modells bei natürlichen Krümmungsfolgen deutlich schlechter ausfallen. Hier ist auch das langsame Entstehen und Zerfallen der Sekundärströmung von Bedeutung. Darüber hinaus geht der 2D-Ansatz von einer einzelnen voll entwickelten Sekundärströmungswalze aus, was gerade für den Wechselbereich zwischen zwei gegensinnigen Kurven nicht zutreffend ist.



## 5 Literatur

- Duan, J.: Simulation of Flow and Mass Dispersion in Meandering Channels, Journal of Hydraulic Engineering, 2004, Vol. 130, No. 10, Seite 964-976
- Kölling, Ch.: Finite-Element-Simulation der Geschwindigkeitsverteilung in Kanälen und teilgefüllten Rohleitungen, Lehrstuhl für Hydraulik und Gewässerkunde, TU München, 1994, Bericht Nr. 60
- Malcherek, A.: Hydromechanik der Fließgewässer, Institut für Strömungsmechanik und elektronisches Rechnen im Bauwesen, Universität Hannover, 2001, Bericht Nr. 61
- Olsen, N. R. B.: SSIIM users manual, Norwegian Univ. Of. Science and Technology, available at [www.bygg.ntnu.no/~nilsol/ssiimwin](http://www.bygg.ntnu.no/~nilsol/ssiimwin)
- Schmautz, M.: Eigendynamische Gewässerentwicklung in einer geraden Gewässerstrecke – Entwicklung und Untersuchungen an einem numerischen Modell, berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München, 2003, Nr. 96
- Stein, C. J.: Mäandrierende Fließgewässer mit überströmten Vorländern – Experimentelle Untersuchungen und numerische Simulation, Mitteilungen des Institutes für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen, 1990, Band 76
- Zanke, U.; Mewis, P.: Morphodynamisches Simulationsmodell TIMOR. Wasser & Boden, 54/4, 14-22, Jahrgang 2002

### Autoren:

Dipl.-Ing. Tobias Hafner,  
Dr.-Ing. Manfred Schindler  
Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
TU München  
Arcisstr. 21  
80333 München  
Tel: ++049/ 289-23161  
Fax: ++049/ 289-23172  
E-Mail: [t.hafner@bv.tum.de](mailto:t.hafner@bv.tum.de) [m.schindler@bv.tum.de](mailto:m.schindler@bv.tum.de)